

次なる「IBMの法則」 ひっぱれば速くなる

米IBM Corp.がまたしても新しいプロセス技術を発表した。
今度はLSIの動作速度を35%向上できる「ひずみSi」と呼ぶ技術である。
わずか2年後の2003年までに実用化するという。
日本メーカーも同じ技術に目を付けて開発を進めていたが
いつの間にか追い越されてしまった。
慌てふためく日本メーカーを尻目に、IBM社は実用化に向けて着実に進む。

Leading Trends

朝早くにもかかわらず、気が付くと会場は人で溢れ返っていた。着席できない人が会場の後ろに幾重にも重なっている。人々は発表者の言葉を一言も聞き逃すまいと息を潜めて真剣に聞き入っていた。

発表が終わるや否や、参加者達は、次々と立ち上がって質問用のマイクに殺到した。4本用意されたマイクのそれぞれに列ができ、次の質問を發しようとして互いに牽制あっている。休憩時間に入っても至る所で人の輪ができ、発表内容についての白熱した議論が続いた。

LSIの性能が35%アップする

2001年6月12日～14日に京都で開催されたLSIの国際学会「2001 Symposium on VLSI Technology」での一コマ

である。これほどまでに注目を集めたのは、米IBM Corp.のプロセス技術に関する2件の発表だった。IBM社は、学会での講演の前日にその概要を新聞発表した。このニュースは、インターネットを通じてその日のうちに広がり、技術の詳細や完成度について情報を得ようとする技術者達が学会に詰め掛けることになった。

発表の内容は、LSIの動作速度を35%向上できる「ひずみSi」と呼ぶ技術に関するもの。トランジスタを構成するSi膜にひずみを加えることでLSIの性能を引き上げる。従来のCMOSトランジスタの製造工程との違いは、一部の材料を変更することくらい。既存の製造設備を転用できるため、コストをそれほど高めることなく性能を向上できる。

あと2年で実用化

IBM社の発表が衝撃的だったのは、技術的な内容だけではない。この技術を2003年に実用化すると宣言したことも技術者達を驚かせた⁽¹⁾。「2003年まであと2年しかない。実用化のハードルは相当高いと思う」と各社の技術者は当惑する。それでも次の一言を付け加えるのを忘れない。「あのIBM社だから、本当にやってくるかもしれない」(図1)。

あのIBM社だからと言わしめるのは、これまでのIBM社の実績である。1990年代後半に同社は、新しいプロセス技術を次々と発表し、いずれも数年以内に実用化してきた。SiGe、Cu配線⁺、SOI (silicon on insulator) 基板⁺といった先端技術を、実用化を表明してから2～3年で製品に利用した (図2)。「有

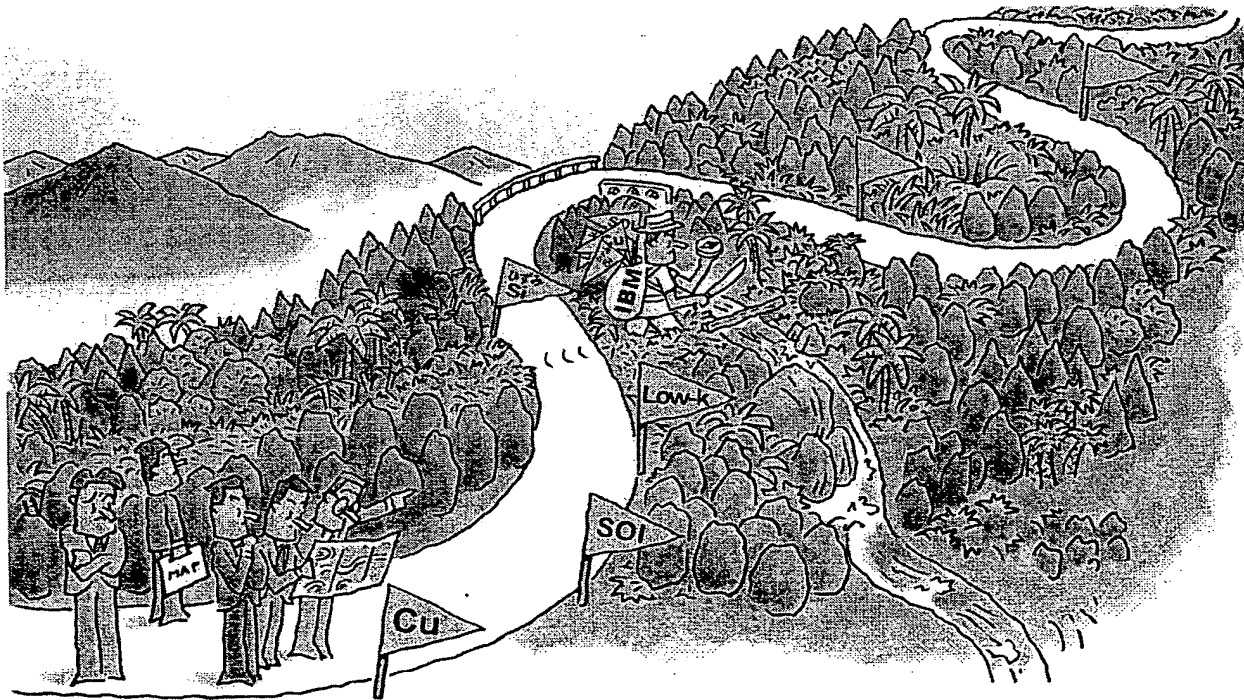


図1 道なき道を進む
米IBM Corp.は、独自の戦略に基づき新しいプロセス技術を積極的に採用してきた。これまでにSiGe、Cu配線、SOI基板などを他社に先駆けて実用化している。2001年6月には次なる技術としてLSIの動作速度を高める「ひずみSi」を発表、いち早く製品に取り入れるべく研究開発を進めている。(イラスト：村松ガイチ)

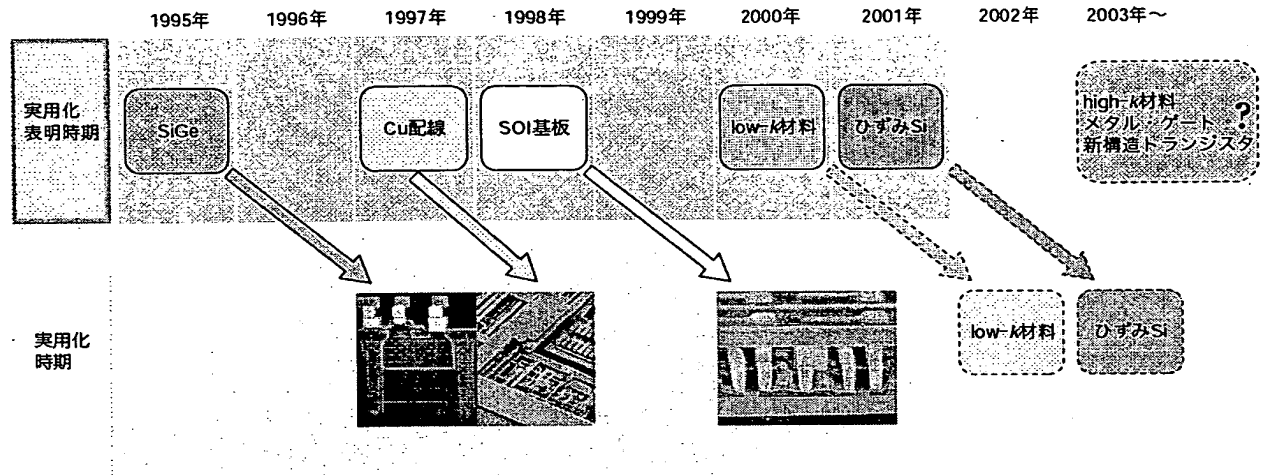


図2 米IBM Corp.は有言実行
米IBM Corp.は、実用化を宣言したプロセス技術をほぼスケジュール通りに製品化してきた。同社は2001年6月に「ひずみSiを2003年までに実用化する」と発表した。これまでの実績から推測して今回もその通りになるとみる技術者は少なくない。(図：本誌、写真：米IBM Corp.)

言実行」を地で行くIBM社だけに、ひずみSiを2003年に実用化するという言葉にも現実味がある。

今回の研究成果も、製品への適用が遠くないと感じさせる。発表を聞いた技術者からは「実用化に向けてかなりいい線を行っている」(東芝のLSIの開発技術者)との声が相次いだ。

特に技術者の注目を集めたのは、実効ゲート長が67nmと小さいトランジスタを試作したことだった(図3)①。ひずみSiを用いて製品に近いレベルのトランジスタを試作するのは今回が初めて。試作したトランジスタを使って電子の移動度を測定した結果、ひずみSiを用い

な場合に比べて移動度が70%向上することを実際に確かめた(図4)。これは、LSIの動作速度に換算すると35%の向上に相当する数字という。1.5MV/cmという高電界側でも優れた特性を得たことで、将来の微細化にも十分に耐え得ることも示している②。

臍をかむ国内メーカー

IBM社の発表を聞いた国内半導体メーカーの反応は、立場によって真っ二つに分かれる。プロセスを利用する立場の技術者は諸手を挙げて歓迎する。「使えるのなら、今すぐにでも使いたい」(三菱電機のLSIの開発技術者)と興味

津々だ。

一方で半導体の製造プロセスの研究者は、口々に「悔しい」と無念さをあらわにする。そこまで悔しがするのも無理はない。実は国内メーカーも、同じ技術の開発を進めてきたのである。特に東芝は、いち早くひずみSiの可能性に目を付けて学会発表を繰り返してきた。

現在に近い形で発表したのはIBM社よりも早い1999年。発表の後には「IBM社の技術者が詳細について根掘り葉掘り聞いてきた」(東芝 研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー 個別半導体基盤技術ラボラトリー 室長の黒部篤氏)ほどだった。つまり、研究に着

① 1.5μmのゲート長は、従来の半導体プロセスでは実現が困難な領域に属する。このゲート長を実現するために、ひずみSiが用いられている。ひずみSiは、シリコンに圧力を加えることで、原子間距離が変化し、電子の移動度が向上する。この効果を利用して、高速動作の半導体デバイスが実現されている。

② この結果、従来の半導体プロセスに比べて、電子の移動度が70%向上したことが確認された。これは、LSIの動作速度に換算すると35%の向上に相当する数字である。

③ SOI (Silicon on Insulator) 基板上に形成されたトランジスタは、従来の半導体プロセスと比べて、寄生容量が低く、動作速度が向上する。この特性を利用して、高速動作の半導体デバイスが実現されている。

④ 東芝は、1999年にひずみSiの特性について学会発表を行った。この発表は、IBM社の発表よりも早いものであった。東芝は、ひずみSiの可能性に早くから注目しており、研究開発を進めてきた。

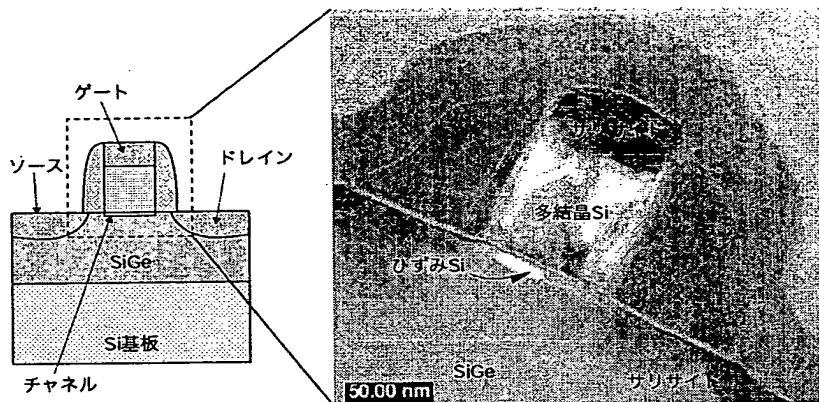


図3 ひずみSiを利用したトランジスタを試作
米IBM Corp.は、チャネル部分にひずみSiを用いたトランジスタを試作した。実効ゲート長は67nmと小さい。ひずみSiによってLSIの動作速度は35%以上向上するという。(図：本誌、写真：米IBM Corp.)

手するのは早かったのに、いつの間にか
IBM社に追い越されてしまったのだ。

東芝以外にもひずみSiを研究している国内半導体メーカーは少なくない³⁾。ところが各社とも、実用化の時期は2005年ころと見積もっていた。IBM社が実用化する時期と比べて2年も後である。

国内メーカーの判断の根底にあるのは、「ムーアの法則」¹である。ムーアの法則が象徴的に示すように、半導体業界には数年後のLSIの集積度や性能について暗黙の了解がある。各社はこの了解を基にして、開発すべき技術のロー

ドマップを描いている。最近では、微細化だけによる性能向上の限界が見え始めており、各社とも従来のトレンドを維持するために、新材料の導入を検討し始めたところだ^(注1)。ひずみSiはその候補の一つで、微細化や性能向上のベースからいって、2005年ごろに必要なるとみていた(図5)。

他社に先駆けて成功する

IBM社はこのような他社の常識を歯牙にもかけない。それどころか、同社は他社の常識を逆手に取ることでビジネ

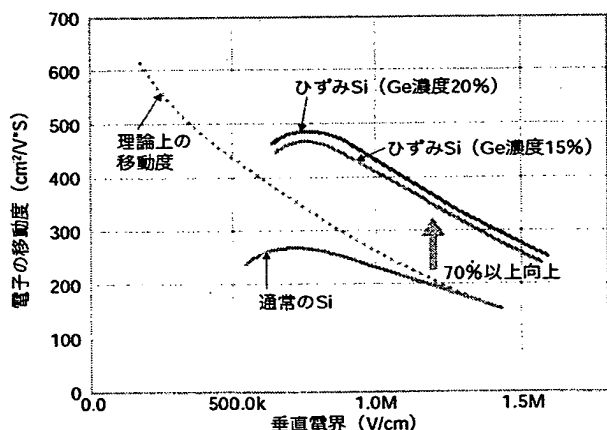


図4 電子の移動度が70%以上向上
米IBM Corp.が試作したひずみSiを使ったトランジスタでは、電子の移動度が、通常のSiを使ったトランジスタに比べて70%以上向上した。(図：米IBM Corp.)

スを拡大してきたといえる。

1990年代後半、IBM社は業界の予測に先駆けて先端技術を導入するという独自の戦略を打ち出し、次々に成功を収めてきた。この戦略の有効性を国内外の業界関係者に印象付けたのは、Cu配線の採用だった。IBM社がCu配線の実用化を決めたとき、「しばらくはAl配線で十分。ロードマップから見ればCu配線が必要なのはまだ先」と多くの半導体メーカーは相手にしなかった。

ところがフタを開けてみると、少しでも性能の高い製品を求めるユーザーは、Cu配線を求めてIBM社に殺到した²⁾。Cu配線を採用した1998年以降、同社は特定顧客向けLSIで大きく売り上げを伸ばしている^(注5)。

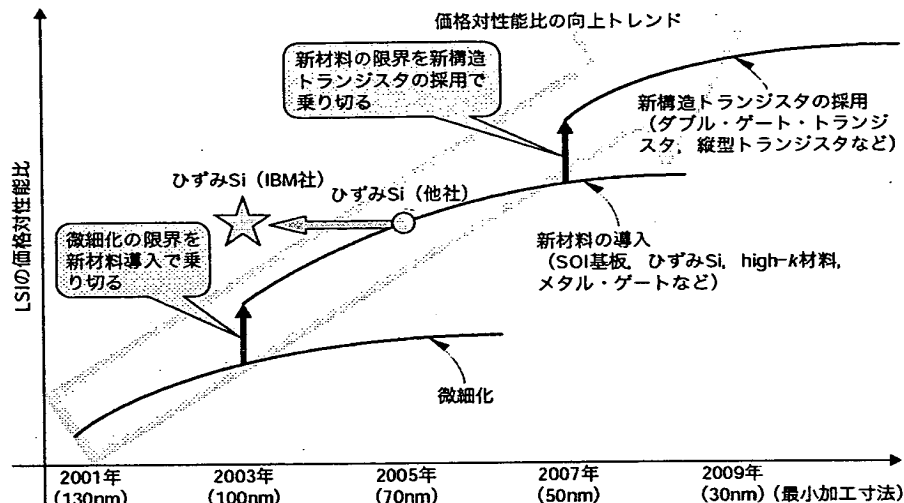
反対に日本の半導体メーカーは、ユーザーからのCu配線に対する要望に頭を抱えることになった。Cu配線の実用化を前倒して進めざるを得くなり、開発現場は右往左往するばかり。未だにCu配線に対応できていない国内メーカーもあるほどだ。

IBM社は、Cu配線以外にもSiGe、SOI基板、low- k 材料などで全く同じ手法を使ってきた。今回のひずみSiについても、「Cu配線やSOI基板などと同様のインパクトがある技術」(IBM社、T.J. Watson Research Center, Exploratory Devices and Integration Technology、

(2) 本報告の生涯健康の調査は、その資料が豊富で、
種々、その結果を比較検討することができ、その結果を
他の研究と照合することが可能である。

[illegible]

図5 先行して新技術を導入する論理LSIは、これまでのように単純に微細化を進めていくだけでは2003年ごろに性能向上のペースが鈍化する可能性が高い。半導体メーカー各社は、新しい材料を導入することで従来の性能向上のペースを保つ計画である。新材料の中でもひずみSiについては、2005年以降に実用化を予定するメーカーが多い。米IBM Corp.は、この時期を待たずに新技術を導入することで、他社の引き離しを図る。(図：各社の資料を基に本誌が作成)



Senior ManagerのHon-Sum Philip Wong氏)として、Cu配線などと並ぶ「第5の技術」と位置付ける。

「IBMの法則」

これまでIBM社が新技術を発表したときと同様、日本の半導体メーカーはIBM社の後を追うことになるだろう。IBM社の発表をキッカケに、ひずみSiの実用化に向けた研究開発が活発になりそうな気配である。現場の技術者は、IBM社の発表に刺激されたトップの要求で「ひずみSiに関する資料作りにおおわらわだ」(複数の技術者)ともらす。

IBM社が発表した技術を、次の開発の目標として後追いする。この構図は、

国内半導体メーカーがこれまで開発の指針にしてきた「ムーアの法則」から、「IBMの法則」とでも呼べそうな指針に宗旨替えをしたかに写る。IBM社のお墨付きで開発の方向を絞り込むこの指針は、微細化の効果に陰りがみえる今、一見妥当なものに思える。

現実には、他社の二番煎じのメーカーが勝つ残れるほど、これからの半導体市場は甘くはないだろう。IBM社が成功したのは、ムーアの法則に囚われた他のメーカーとは異なる独自戦略を打ち出したからである。国内半導体メーカーが、「ムーアの法則」を「IBMの法則」に代えたところで、他社と似たり寄ったりの将来像を描くという姿勢は変わら

ない。IBM社が次々に繰り出す新技術に対抗するには、国内メーカーも他社にはない独自戦略を打ち出すことが必要だろう。

SiGe膜の成膜方法が実用化のカギ

ひずみSiを実用化するまでに乗り越えなければならない壁はいくつもある(表1)。量産時の歩留まりを上げるプロセス技術の確立や、物理学的な原理の解明など、課題は山積している。なかでも実用化のカギを握るのは、Si膜の下地となるSiGe膜である。

ひずみSiが、LSIの動作速度を向上させる秘密はトランジスタのチャネル部分

LSIの性能向上は、微細化を進めていくだけでは2003年ごろに性能向上のペースが鈍化する可能性が高い。半導体メーカー各社は、新しい材料を導入することで従来の性能向上のペースを保つ計画である。新材料の中でもひずみSiについては、2005年以降に実用化を予定するメーカーが多い。米IBM Corp.は、この時期を待たずに新技術を導入することで、他社の引き離しを図る。(図：各社の資料を基に本誌が作成)

(1) 2001年12月、1996年8月、Cu配線を導入した「IBMの法則」の法則。その後の2003年、2005年、2007年、2009年、2011年、2013年、2015年、2017年、2019年、2021年、2023年、2025年、2027年、2029年、2031年、2033年、2035年、2037年、2039年、2041年、2043年、2045年、2047年、2049年、2051年、2053年、2055年、2057年、2059年、2061年、2063年、2065年、2067年、2069年、2071年、2073年、2075年、2077年、2079年、2081年、2083年、2085年、2087年、2089年、2091年、2093年、2095年、2097年、2099年、2101年、2103年、2105年、2107年、2109年、2111年、2113年、2115年、2117年、2119年、2121年、2123年、2125年、2127年、2129年、2131年、2133年、2135年、2137年、2139年、2141年、2143年、2145年、2147年、2149年、2151年、2153年、2155年、2157年、2159年、2161年、2163年、2165年、2167年、2169年、2171年、2173年、2175年、2177年、2179年、2181年、2183年、2185年、2187年、2189年、2191年、2193年、2195年、2197年、2199年、2201年、2203年、2205年、2207年、2209年、2211年、2213年、2215年、2217年、2219年、2221年、2223年、2225年、2227年、2229年、2231年、2233年、2235年、2237年、2239年、2241年、2243年、2245年、2247年、2249年、2251年、2253年、2255年、2257年、2259年、2261年、2263年、2265年、2267年、2269年、2271年、2273年、2275年、2277年、2279年、2281年、2283年、2285年、2287年、2289年、2291年、2293年、2295年、2297年、2299年、2301年、2303年、2305年、2307年、2309年、2311年、2313年、2315年、2317年、2319年、2321年、2323年、2325年、2327年、2329年、2331年、2333年、2335年、2337年、2339年、2341年、2343年、2345年、2347年、2349年、2351年、2353年、2355年、2357年、2359年、2361年、2363年、2365年、2367年、2369年、2371年、2373年、2375年、2377年、2379年、2381年、2383年、2385年、2387年、2389年、2391年、2393年、2395年、2397年、2399年、2401年、2403年、2405年、2407年、2409年、2411年、2413年、2415年、2417年、2419年、2421年、2423年、2425年、2427年、2429年、2431年、2433年、2435年、2437年、2439年、2441年、2443年、2445年、2447年、2449年、2451年、2453年、2455年、2457年、2459年、2461年、2463年、2465年、2467年、2469年、2471年、2473年、2475年、2477年、2479年、2481年、2483年、2485年、2487年、2489年、2491年、2493年、2495年、2497年、2499年、2501年、2503年、2505年、2507年、2509年、2511年、2513年、2515年、2517年、2519年、2521年、2523年、2525年、2527年、2529年、2531年、2533年、2535年、2537年、2539年、2541年、2543年、2545年、2547年、2549年、2551年、2553年、2555年、2557年、2559年、2561年、2563年、2565年、2567年、2569年、2571年、2573年、2575年、2577年、2579年、2581年、2583年、2585年、2587年、2589年、2591年、2593年、2595年、2597年、2599年、2601年、2603年、2605年、2607年、2609年、2611年、2613年、2615年、2617年、2619年、2621年、2623年、2625年、2627年、2629年、2631年、2633年、2635年、2637年、2639年、2641年、2643年、2645年、2647年、2649年、2651年、2653年、2655年、2657年、2659年、2661年、2663年、2665年、2667年、2669年、2671年、2673年、2675年、2677年、2679年、2681年、2683年、2685年、2687年、2689年、2691年、2693年、2695年、2697年、2699年、2701年、2703年、2705年、2707年、2709年、2711年、2713年、2715年、2717年、2719年、2721年、2723年、2725年、2727年、2729年、2731年、2733年、2735年、2737年、2739年、2741年、2743年、2745年、2747年、2749年、2751年、2753年、2755年、2757年、2759年、2761年、2763年、2765年、2767年、2769年、2771年、2773年、2775年、2777年、2779年、2781年、2783年、2785年、2787年、2789年、2791年、2793年、2795年、2797年、2799年、2801年、2803年、2805年、2807年、2809年、2811年、2813年、2815年、2817年、2819年、2821年、2823年、2825年、2827年、2829年、2831年、2833年、2835年、2837年、2839年、2841年、2843年、2845年、2847年、2849年、2851年、2853年、2855年、2857年、2859年、2861年、2863年、2865年、2867年、2869年、2871年、2873年、2875年、2877年、2879年、2881年、2883年、2885年、2887年、2889年、2891年、2893年、2895年、2897年、2899年、2901年、2903年、2905年、2907年、2909年、2911年、2913年、2915年、2917年、2919年、2921年、2923年、2925年、2927年、2929年、2931年、2933年、2935年、2937年、2939年、2941年、2943年、2945年、2947年、2949年、2951年、2953年、2955年、2957年、2959年、2961年、2963年、2965年、2967年、2969年、2971年、2973年、2975年、2977年、2979年、2981年、2983年、2985年、2987年、2989年、2991年、2993年、2995年、2997年、2999年、3001年、3003年、3005年、3007年、3009年、3011年、3013年、3015年、3017年、3019年、3021年、3023年、3025年、3027年、3029年、3031年、3033年、3035年、3037年、3039年、3041年、3043年、3045年、3047年、3049年、3051年、3053年、3055年、3057年、3059年、3061年、3063年、3065年、3067年、3069年、3071年、3073年、3075年、3077年、3079年、3081年、3083年、3085年、3087年、3089年、3091年、3093年、3095年、3097年、3099年、3101年、3103年、3105年、3107年、3109年、3111年、3113年、3115年、3117年、3119年、3121年、3123年、3125年、3127年、3129年、3131年、3133年、3135年、3137年、3139年、3141年、3143年、3145年、3147年、3149年、3151年、3153年、3155年、3157年、3159年、3161年、3163年、3165年、3167年、3169年、3171年、3173年、3175年、3177年、3179年、3181年、3183年、3185年、3187年、3189年、3191年、3193年、3195年、3197年、3199年、3201年、3203年、3205年、3207年、3209年、3211年、3213年、3215年、3217年、3219年、3221年、3223年、3225年、3227年、3229年、3231年、3233年、3235年、3237年、3239年、3241年、3243年、3245年、3247年、3249年、3251年、3253年、3255年、3257年、3259年、3261年、3263年、3265年、3267年、3269年、3271年、3273年、3275年、3277年、3279年、3281年、3283年、3285年、3287年、3289年、3291年、3293年、3295年、3297年、3299年、3301年、3303年、3305年、3307年、3309年、3311年、3313年、3315年、3317年、3319年、3321年、3323年、3325年、3327年、3329年、3331年、3333年、3335年、3337年、3339年、3341年、3343年、3345年、3347年、3349年、3351年、3353年、3355年、3357年、3359年、3361年、3363年、3365年、3367年、3369年、3371年、3373年、3375年、3377年、3379年、3381年、3383年、3385年、3387年、3389年、3391年、3393年、3395年、3397年、3399年、3401年、3403年、3405年、3407年、3409年、3411年、3413年、3415年、3417年、3419年、3421年、3423年、3425年、3427年、3429年、3431年、3433年、3435年、3437年、3439年、3441年、3443年、3445年、3447年、3449年、3451年、3453年、3455年、3457年、3459年、3461年、3463年、3465年、3467年、3469年、3471年、3473年、3475年、3477年、3479年、3481年、3483年、3485年、3487年、3489年、3491年、3493年、3495年、3497年、3499年、3501年、3503年、3505年、3507年、3509年、3511年、3513年、3515年、3517年、3519年、3521年、3523年、3525年、3527年、3529年、3531年、3533年、3535年、3537年、3539年、3541年、3543年、3545年、3547年、3549年、3551年、3553年、3555年、3557年、3559年、3561年、3563年、3565年、3567年、3569年、3571年、3573年、3575年、3577年、3579年、3581年、3583年、3585年、3587年、3589年、3591年、3593年、3595年、3597年、3599年、3601年、3603年、3605年、3607年、3609年、3611年、3613年、3615年、3617年、3619年、3621年、3623年、3625年、3627年、3629年、3631年、3633年、3635年、3637年、3639年、3641年、3643年、3645年、3647年、3649年、3651年、3653年、3655年、3657年、3659年、3661年、3663年、3665年、3667年、3669年、3671年、3673年、3675年、3677年、3679年、3681年、3683年、3685年、3687年、3689年、3691年、3693年、3695年、3697年、3699年、3701年、3703年、3705年、3707年、3709年、3711年、3713年、3715年、3717年、3719年、3721年、3723年、3725年、3727年、3729年、3731年、3733年、3735年、3737年、3739年、3741年、3743年、3745年、3747年、3749年、3751年、3753年、3755年、3757年、3759年、3761年、3763年、3765年、3767年、3769年、3771年、3773年、3775年、3777年、3779年、3781年、3783年、3785年、3787年、3789年、3791年、3793年、3795年、3797年、3799年、3801年、3803年、3805年、3807年、3809年、3811年、3813年、3815年、3817年、3819年、3821年、3823年、3825年、3827年、3829年、3831年、3833年、3835年、3837年、3839年、3841年、3843年、3845年、3847年、3849年、3851年、3853年、3855年、3857年、3859年、3861年、3863年、3865年、3867年、3869年、3871年、3873年、3875年、3877年、3879年、3881年、3883年、3885年、3887年、3889年、3891年、3893年、3895年、3897年、3899年、3901年、3903年、3905年、3907年、3909年、3911年、3913年、3915年、3917年、3919年、3921年、3923年、3925年、3927年、3929年、3931年、3933年、3935年、3937年、3939年、3941年、3943年、3945年、3947年、3949年、3951年、3953年、3955年、3957年、3959年、3961年、3963年、3965年、3967年、3969年、3971年、3973年、3975年、3977年、3979年、3981年、3983年、3985年、3987年、3989年、3991年、3993年、3995年、3997年、3999年、4001年、4003年、4005年、4007年、4009年、4011年、4013年、4015年、4017年、4019年、4021年、4023年、4025年、4027年、4029年、4031年、4033年、4035年、4037年、4039年、4041年、4043年、4045年、4047年、4049年、4051年、4053年、4055年、4057年、4059年、4061年、4063年、4065年、4067年、4069年、4071年、4073年、4075年、4077年、4079年、4081年、4083年、4085年、4087年、4089年、4091年、4093年、4095年、4097年、4099年、4101年、4103年、4105年、4107年、4109年、4111年、4113年、4115年、4117年、4119年、4121年、4123年、4125年、4127年、4129年、4131年、4133年、4135年、4137年、4139年、4141年、4143年、4145年、4147年、4149年、4151年、4153年、4155年、4157年、4159年、4161年、4163年、4165年、4167年、4169年、4171年、4173年、4175年、4177年、4179年、4181年、4183年、4185年、4187年、4189年、4191年、4193年、4195年、4197年、4199年、4201年、4203年、4205年、4207年、4209年、4211年、4213年、4215年、4217年、4219年、4221年、4223年、4225年、4227年、4229年、4231年、4233年、4235年、4237年、4239年、4241年、4243年、4245年、4247年、4249年、4251年、4253年、4255年、4257年、4259年、4261年、4263年、4265年、4267年、4269年、4271年、4273年、4275年、4277年、4279年、4281年、4283年、4285年、4287年、4289年、4291年、4293年、4295年、4297年、4299年、4301年、4303年、4305年、4307年、4309年、4311年、4313年、4315年、4317年、4319年、4321年、4323年、4325年、4327年、4329年、4331年、4333年、4335年、4337年、4339年、4341年、4343年、4345年、4347年、4349年、4351年、4353年、4355年、4357年、4359年、4361年、4363年、4365年、4367年、4369年、4371年、4373年、4375年、4377年、4379年、4381年、4383年、4385年、4387年、4389年、4391年、4393年、4395年、4397年、4399年、4401年、4403年、4405年、4407年、4409年、4411年、4413年、4415年、4417年、4419年、4421年、4423年、4425年、4427年、4429年、4431年、4433年、4435年、4437年、4439年、4441年、4443年、4445年、4447年、4449年、4451年、4453年、4455年、4457年、4459年、4461年、4463年、4465年、4467年、4469年、4471年、4473年、4475年、4477年、4479年、4481年、4483年、4485年、4487年、4489年、4491年、4493年、4495年、4497年、4499年、4501年、4503年、4505年、4507年、4509年、4511年、4513年、4515年、4517年、4519年、4521年、4523年、4525年、4527年、4529年、4531年、4533年、4535年、4537年、4539年、4541年、4543年、4545年、4547年、4549年、4551年、4553年、4555年、4557年、4559年、4561年、4563年、4565年、4567年、4569年、4571年、4573年、4575年、4577年、4579年、4581年、4583年、4585年、4587年、4589年、4591年、4593年、4595年、4597年、4599年、4601年、4603年、4605年、4607年、4609年、4611年、4613年、4615年、4617年、4619年、4621年、4623年、4625年、4627年、4629年、4631年、4633年、4635年、4637年、4639年、4641年、4643年、4645年、4647年、4649年、4651年、4653年、4655年、4657年、4659年、4661年、4663年、4665年、4667年、4669年、4671年、4673年、4675年、4677年、4679年、4681年、4683年、4685年、4687年、4689年、4691年、4693年、4695年、4697年、4699年、4701年、4703年、4705年、4707年、4709年、4711年、4713年、4715年、4717年、4719年、4721年、4723年、4725年、4727年、4729年、4731年、4733年、4735年、4737年、4739年、4741年、4743年、4745年、4747年、4749年、4751年、4753年、4755年、4757年、4759年、4761年、4763年、4765年、4767年、4769年、4771年、4773年、4775年、4777年、4779年、4781年、4783年、4785年、4787年、4789年、4791年、4793年、4795年、4797年、4799年、4801年、4803年、4805年、4807年、4809年、4811年、4813年、4815年、4817年、4819年、4821年、4823年、4825年、4827年、4829年、4831年、4833年、4835年、4837年、4839年、4841年、4843年、4845年、4847年、4849年、4851年、4853年、4855年、4857年、4859年、4861年、4863年、4865年、4867年、4869年、4871年、4873年、4875年、4877年、4879年、4881年、4883年、4885年、4887年、4889年、4891年、4893年、4895年、4897年、4899年、4901年、4903年、4905年、4907年、4909年、4911年、4913年、4915年、4917年、4919年、4921年、4923年、4925年、4927年、4929年、4931年、4933年、4935年、4937年、4939年、4941年、4943年、4945年、4947年、4949年、4951年、4953年、4955年、4957年、4959年、4961年、4963年、4965年、4967年、4969年、4971年、4973年、4975年、4977年、4979年、4981年、4983年、4985年、4987年、4989年、4991年、4993年、4995年、4997年、4999年、5001年、5003年、5005年、5007年、5009年、5011年、5013年、5015年、5017年、5019年、5021年、5023年、5025年、5027年、5029年、5031年、5033年、5035年、5037年、5039年、5041年、5043年、5045年、5047年、5049年、5051年、5053年、5055年、5057年、5059年、5061年、5063年、5065年、5067年、5069年、5071年、5073年、5075年、5077年、5079年、5081年、5083年、5085年、5087年、5089年、5091年、5093年、5095年、5097年、5099年、5101年、5103年、5105年、5107年、5109年、5111年、5113年、5115年、5117年、5119年、5121年、5123年、5125年、5127年、5129年、5131年、5133年、5135年、5137年、5139年、5141年、5143年、5145年、5147年、5149年、5151年、5153年、5155年、5157年、5159年、5161年、5163年、5165年、5167年、5169年、5171年、5173年、5175年、5177年、5179年、5181年、5183年、5185年、5187年、5189年、5191年、5193年、5195年、5197年、5199年、5201年、5203年、5205年、5207年、5209年、5211年、5213年、5215年、5217年、5219年、5221年、5223年、5225年、5227年、5229年、5231年、5233年、5235年、5237年、5239年、5241年、5243年、5245年、5247年、5249年、5251年、5253年、5255年、5257年、5259年、5261年、5263年、5265年、5267年、5269年、5271年、5273年、5275年、5277年、5279年、5281年、5283年、5285年、5287年、5289年、5291年、5293年、5295年、5297年、5299年、5301年、5303年、5305年、5307年、5309年、5311年、5313年、5315年、5317年、5319年、5321年、5323年、5325年、5327年、5329年、5331年、5333年、5335年、5337年、5339年、5341年、5343年、5345年、5347年、5349年、5351年、5353年、5355年、5357年、5359年、5361年、5363年、5365年、5367年、5369年、5371年、5373年、5375年、5377年、5379年、5381年、5383年、5385年、5387年、5389年、5391年、5393年、5395年、5397年、5399年、5401年、5403年、5405年、5407年、5409年、5411年、5413年、5415年、5417年、5419年、5421年、5423年、5425年、5427年、5429年、5431年、5433年、5435年、5437年、5439年、5441年、5443年、5445年、5447年、5449年、5451年、5453年、5455年、5457年、5459年、5461年、5463年、5465年、5467年、5469年、5471年、5473年、5475年、5477年、5479年、5481年、5483年、5485年、5487年、5489年、5491年、5493年、5495年、5497年、5499年、5501年、5503年、5505年、5507年、5509年、5511年、5513年、5515年、5517年、5519年、5521年、5523年、5525年、5527年、5529年、5531年、5533年、5535年、5537年、5539年、5541年、5543年、5545年、5547年、5549年、5551年、5553年、5555年、5557年、5559年、5561年、5563年、5565年、5567年、5569年、5571年、55

Leading Trends

表1 ひずみSiの実用化への課題

実用化までに克服しなければならない課題は多い。ひずみの信頼性を確保したり、移動度向上のメカニズムを解明する必要がある。今後実用化が進む新技術との組み合わせの検討も始まった。(表：本誌)

開発項目	課題
ひずみの制御	ひずみの耐熱性の検証 ウエハー面内で均一のひずみを確保する
良質なSiGe膜の形成	Ge濃度を上げる 欠陥(転位)の発生を抑える 表面の平坦度を上げる
正孔の移動度を上げる	移動度向上のメカニズムを解明する
他の技術と組み合わせる	SOI基板、high-k材料、メタル・ゲートなどのプロセスと整合を取る
その他	ひずみSi中ではAsが拡散しやすいために、ソースやドレインからのAsの拡散を予防する

のSi膜に応力を加えてひずませることに
ある(図6)。ひずんだSi膜中では、電
子の散乱が減少し、正孔の有効質量が
減る。この結果、電子や正孔、すなわ
ちキャリアの移動度が向上し、LSIの動
作速度が上がるという仕組みだ。

Si膜にひずみを加えるために必要なの
がSiGe膜である。Siよりも格子定数の
大きいSiGeの上にSi膜を成膜すると、Si
膜は下地のSiGe膜の格子定数を維持し
ながら成長する。Si膜には引っ張り応
力が加わり、通常よりも格子間隔が広
がったひずみSiができていく。

欠陥の少ないSiGe膜を作る

SiGe膜の成膜が大きな課題になるの
は、SiGe膜中に欠陥が生じやすいから
である。SiGe膜に含まれる欠陥がSiGe
膜の表面にまで貫通すると、ひずみSi膜
の表面の平坦性が劣化する。その結果

ひずみSiの上に形成するゲート酸化膜
の信頼性が落ちたり、欠陥に沿って電
流が流れる接合リークなどが顕在化す
る可能性がある。「SiGe膜中の欠陥をい
かに減らすかが、ひずみSi実用化の最大
のポイントだ」(IBM社のWong氏)。

SiGe膜に欠陥が生じやすいのは、次
の理由による。SiGe膜は、下地のSi膜
上に成膜する。このとき、下地のSi膜
と接する部分では、SiGeはSiの格子定
数を保っている。一方でひずみを加える
Si膜との界面では、SiGe本来の格子定
数に戻す必要があるため、SiGe膜を成
長させるに従って、結晶格子を徐々に緩
和させなければならない。SiGe膜の欠
陥は、結晶格子を緩和させるときに不
可避的に生じるものといえる。

SiGe膜の欠陥の低減は、単に製造装
置を購入すれば済むような問題ではな
い。成膜条件の改善などの細かなノウ

ハウを時間をかけて蓄積しなければならない。つまり、他社に先んじて技術を磨
いている先行者が有利になる。

IBM社が、「ひずみSiの実用化で、他
社よりも1~2年は先行している」(同社
のWong氏)と自信を見せる根拠はここ
にある。パイポーラ・トランジスタ向け
にSiGeを早くから実用化してきた同社
は、SiGe膜の成膜技術について他の半
導体メーカーに比べて一日の長がある。
最近では遮断周波数が210GHzと高速な
SiGeパイポーラ・トランジスタ技術を
開発するなど、他社との差を大きく広
げようとしている^{④)}。

SOIとの組み合わせが重要に

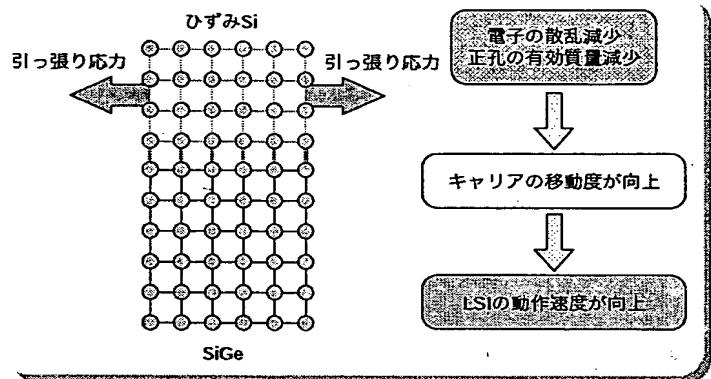
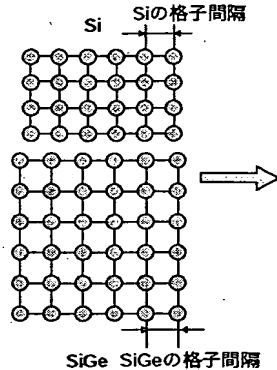
ひずみSi実用化の第2のポイントは、
SOI基板といかに組み合わせるかに
ある。ひずみSiはSOI基板とは独立した
技術だが、実際にはSOI基板と併用する
ことが多くなりそうだ。ひずみSiによる
性能向上の効果がSOI基板と同程度だ
からである(図7)。同じ性能を確保で
きるのであれば、ユーザーはひずみSiよ
りも既に実績のあるSOI基板を選ぶだろ
う。このほかにも、ひずみSiで使用する
SiGe膜がSOI基板特有の「基板浮遊効
果^{⑤)}」を抑えるという利点もあるようだ。
IBM社も、今回の学会でSOI基板とひ
ずみSiを組み合わせた結果を発表して
いる^{⑥)}。

④ 2001年5月27日付、週刊IT実況が210GHzと高
速なSiGeパイポーラ・トランジスタ技術の開発を告
げた。トランジスタ構造や動作電圧などは、従来の約
100nmのSiGeパイポーラ・トランジスタの20nm~40nm
に縮小できるとする。動作電圧は従来の1.5Vを約
0.8Vに下げるとする。また、動作電圧を0.8Vに下げた
場合、動作電流は従来の1.5V動作電圧の場合の
1.5倍に達する。また、動作電圧を0.8Vに下げた場合
の動作電流は従来の1.5V動作電圧の場合の1.5倍に達する。

⑤ 巨大な浮遊効果-SOI基板特有の場合に、トラン
ジスタ本体が基板から絶縁されているため、その下
の基板に電圧が印加されると、その電圧がトランジ
スタ本体に伝わる。この現象を「基板浮遊効果」と
呼ぶ。この現象は、トランジスタの動作電圧を低く
するときに問題となる。この現象を抑えるためには、
トランジスタの動作電圧を低くする必要がある。

図6 格子定数の差が、ひずみを生む

SiGe膜上にエピタキシャル成長法でSi膜を成長すると、Si原子はSiGeの格子間隔を保ったまま成長する。Siは本来、SiGeよりも格子定数小さいので、応力が加わった状態で形成されることになる。この状態のSi中では、電子の散乱が減り、正孔の有効質量が減少するため、両者の移動度が向上する。この結果、LSIの動作が高速になる。(図：米IBM Corp.の資料を基に本誌が作成)

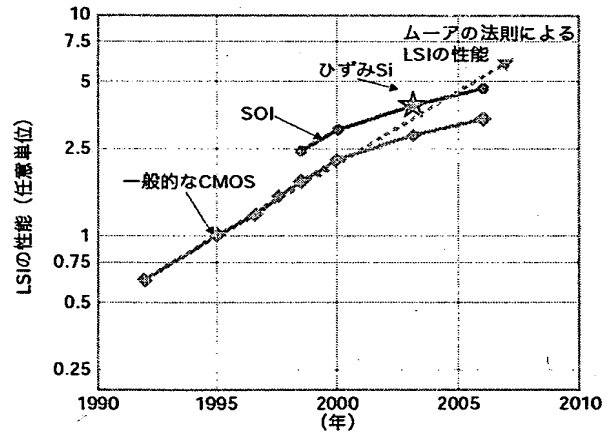


SOI基板とひずみSiを組み合わせた際にポイントになるのが、SiGe膜のGe濃度である。Ge濃度を高くすればSiGeの格子が広がり、Siに加わるひずみが増す。それだけLSIの性能も高まることになる。

ただし、これまでに提案された手法では、Ge濃度を十分に高めることができなかった。例えば、東芝が発表したSiGe膜にOイオンを注入するSIMOX (separation by implanted oxygen) 法を用いる手法では、Ge濃度は15%程度が限界だった³⁾。SIMOX法は、SiO₂膜を形成する際に1350℃の高温アニールが必要になる。Ge濃度を上げるとSiGeの融点が徐々に下がるため、アニール温度を下回らない程度にしかGe濃度を高められない (図8)。

今回IBM社は、別の基板に作成した

図7 ひずみSiとSOI基板の効果は同等
ひずみSiがLSIの動作速度に与える影響は、SOI基板と同等と見込まれる。このため、ひずみSiを単独で用いても、開発で先行するSOI基板に比べてメリットが少ない。米IBM Corp.や東芝などは、ひずみSiとSOI基板を組み合わせる方法を検討している。(図：米IBM Corp.の資料を基に本誌が作成)



SiO₂膜をSiGe膜に張り合わせてSOI基板を作成する手法を発表した⁴⁾。SIMOX法ほど高温でアニールする必要がないため、25%程度と比較的高いGe濃度を維持することができる。IBM社によれば、この程度の濃度が実現できれば十分実

用に耐えるという。「シミュレーション結果によれば、Ge濃度が30%程度まで上がると、キャリアの移動度を向上する効果は薄れてくる」(IBM社、T.J. Watson Research Center, Research Staff MemberのKern Rim氏)。

(注) ひずみSiとSOIを組み合わせたSOI基板は、SiGe膜とSiO₂膜の間にSiGe膜を形成し、その上にSiO₂膜を形成する。SOI (separation by implanted oxygen) 法は、SiO₂膜を形成する際に1350℃の高温アニールが必要になる。

酸化によってGeを濃縮

IBM社以外にも、ひずみSiとSOI基板を組み合わせる手法を模索するメーカーはある。例えば東芝は、酸化濃縮法と呼ぶ手法を開発している。SOI基板上に成膜したSiGe膜を酸化して下地のSi

膜中にGeを追い出すことで、Ge濃度の高いSiGe膜を形成する手法である。

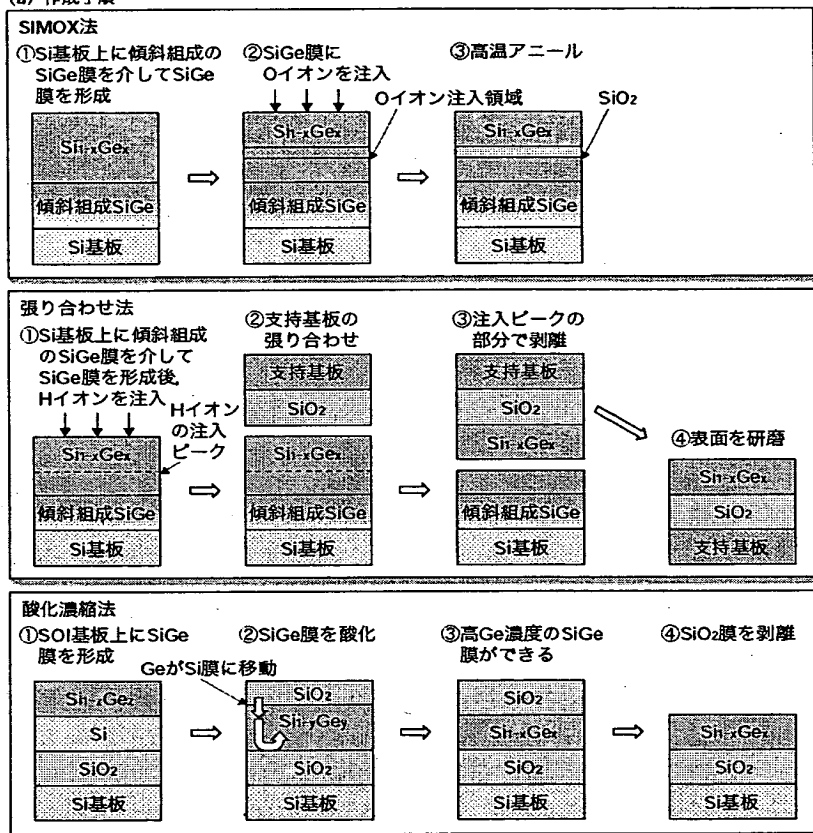
酸化濃縮法では、Ge濃度は最大で57%と高い。ただし、現時点ではSiGe膜の結晶格子の緩和率が50%と低いために実効的なGe濃度は30%程度という。

東芝によれば製造プロセスを工夫することで、緩和率の向上は十分に可能という。この手法には、IBM社の手法と比べてSiGe膜の表面の平坦度が高いなどの利点もある。

ひずみSiとSOI基板を組み合わせる際に、どの方式が最適なのかは議論が分かれるところだ。IBM社も「現時点で最高の性能を出せる方法を提案したまで。2年後の実用化時にどの方式を使うかは決めていない」（IBM社のRim氏）と他の手法も検討していることを匂わせる。ひずみSiの開発で先手を打たれた日本メーカーも、ここでは一矢を報いることができるかもしれない。

(河合 基伸)

(a) 作成手順



(b) 特性比較

SiGe膜の特性	SIMOX法	張り合わせ法	酸化濃縮法
膜厚 (nm)	300	200~300	10
Ge濃度 (%)	<15	15~25	10~57
格子緩和率 (%)	100	>90	50
表面粗さ (nm)	1.1	0.4	0.22

図8 ひずみSiとSOI基板を組み合わせる

ひずみSiとSOI基板を組み合わせる場合は、ひずみSiの下地になるSiGe膜の形成方法がカギとなる。SiO₂膜上にSiGe膜を作成する方法として、SiGe膜にOイオンを注入してSOI基板を作成するSIMOX法、SiO₂膜をSiGe膜に張り合わせてSOI基板を作成する張り合わせ法、SOI基板上のSiGe膜を酸化する酸化濃縮法などがある。SIMOX法では、1350°C程度の高温アニールが必要のためにGe濃度を高めにくい。張り合わせ法は、25%程度までGe濃度を高めることができるが、転位などの欠陥によりSiGe膜の表面が荒れてしまう。酸化濃縮法は、Ge濃度を高くできるが、格子緩和率が50%と低いために実効的なGe濃度は30%程度である。(図：東芝の資料を基に本誌が作成)

参考文献

- 1) Rim, A., Kessler, S., Hergrove, M., Cla, L., Mooney, P.M., Shi, L., Kanakake, T., Boshara, P., Jeong, M., Grill, A. and Wong, H.S.P., "Strained Si MOSFETs for high Performance CMOS Technology," 2001 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers, pp.60-66, Jun.2001.
- 2) 枝, 俊彦, 飯村, 正太郎, 佐藤, 正樹, "ひずみSi MOSFETs," 2001年2月11日, pp.149-155.
- 3) Mizuno, T., Takagi, S., Sugiyama, N., Koga, T., Tezuka, T., Hase, K., Hatakeyama, T., Kanbe, A. and Furuta, A., "High Performance Strained Si p-MOSFETs on SiGe-on-Insulator Substrates Fabricated by SIMOX Technology," Technical Digest of International Electron Device Meeting IEDM'99, pp.931-935, Dec.1999.
- 4) Huang, T.J., Chu, M., Goni, S., T'ien, C.P., Kerner, S.J., Cooper, D.F., Mooney, P.M., Gordon, S.A., Spitzer, J.L., Anderson, R.M. and Wong H.S.P., "Carrier Mobility Enhancement in Strained Si Ge Transistors Fabricated by Water Rending," 2001 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers, pp.17-18, Jun.2001.